

УДК 669.017/019

С.И. Губенко

ЛОКАЛЬНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВБЛИЗИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

Губенко Светлана Ивановна – доктор технических наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, sigubenko@gmail.com

Обсуждаются релаксационные процессы вблизи неметаллических включений, возникающие в условиях появления термических и деформационных напряжений и способствующие появлению локальных мезоскопических субструктур, для которых характерны неоднородности плотности дислокаций, пластические повороты, локальные сбросы, скольжение по границам включение-матрица. Показано влияние этих процессов на локальные структурные изменения в стальной матрице, определяющие влияние неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица в формировании структурной неоднородности сталей при различных деформационных и тепловых воздействиях.

Ключевые слова: сталь, неметаллические включения, границы включение-матрица.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений и деформаций в сталях [1-6]. В настоящее время недостаточно данных, позволяющих проанализировать характер локальных структур, возникающих вблизи включений при различных обработках сталей. Исследование природы перестроек локальных структур вблизи включений необходимо для понимания процессов генерирования дислокаций, проскальзывания, миграции, что, в свою очередь, должно объяснить влияние включений на механические и технологические свойства сталей на разных стадиях производства металлопродукции. Целью настоящей работы был анализ термических и деформационных напряжений и релаксационных процессов, происходящих вблизи неметаллических включений и на межфазных границах включение-матрица сталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дальнействующие поля напряжений в матрице вблизи включений после охлаждения стали на воздухе и пластической деформации определяли электронно-микроскопическим методом измерения изгибных экстинкционных контуров, предложенным в работе [7]. Исследования проводили на фольгах из сталей 08X18H10T и 08Ю, определяя тензоры изгиба-кручения. Для исследования локализации деформации в матрице вблизи включений были выбраны стали 08Ю, Э3, 08X18H10T, 14X2ГМР, а также армко-железо, матрица которых имеет простую структуру и разный тип кристаллической решетки. Образцы подвергали отжигу при температуре 1100 °С для полного протекания рекристаллизации и релаксации напряжений, после чего деформировали растяжением при температуре 25 °С со скоростями деформации 2, 5, 25 и 50 с⁻¹ на установках «Пластометр УЗТМ» и ИМАШ-5С. Для изучения локализации деформации при высоких температурах образцы подвергали растяжению в вакууме при 700...1200 °С на установке ИМАШ-5С. Исследования проводили с помощью оптического ("Neophot -21") и электронного (УЭМ-100) микроскопов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе релаксационных процессов вблизи включений следует иметь в виду, что при переходе через границу включение–матрица происходит резкое изменение химического состава, степени порядка, типа кристаллической решетки, поляризации, намагниченности, деформации и других характеристик. Разрыв каждого из перечисленных показателей вносит свой вклад в структуру границ. Установлено наличие различных дефектов (межфазных дислокаций, ступенек, плоских дефектов упаковки) в структуре границ включение–матрица (рис. 1, а, б) [6]. Различие физических, механических и химических свойств включения и матрицы стали приводит к возникновению напряжений на границе их раздела, величина которых зависит от ряда факторов: когерентности включения и матрицы, которая определяется степенью соответствия их кристаллических структур и энергией поверхности раздела; формы и размера включения; расстояния между включениями, определяющего их взаимное влияние; объемной доли включений; распределения включений. Совместным действием приведенных факторов определяется роль включений как концентраторов напряжений [1]. Вблизи поверхности включения они имеют величину порядка $G_M / 100$, где G_M – модуль сдвига матрицы [1].

Термические напряжения вблизи включений определяли по различию коэффициентов термического расширения включения (α_v) и матрицы (α_m) [1]. Структурные напряжения у включений пропорциональны выражению:

$$\pm F[(\alpha_m - \alpha_v)\Delta T], \quad (1)$$

где F – функция, зависящая от модулей упругости включения и матрицы, формы, размера и распределения включений; ΔT – изменение температуры.

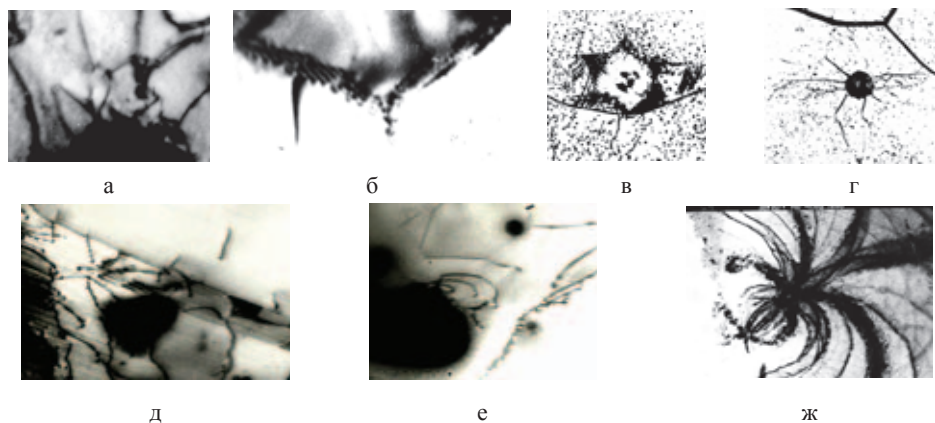


Рис. 1. Границы включение–матрица стали (а, б) и локальная структура стальной матрицы вблизи, возникшая вследствие термических напряжений; а, б – $\times 60000$; в, г – $\times 600$; д – ж – $\times 20000$

Рассчитывали величину напряжений в зависимости от соотношения радиуса зоны матрицы вокруг включения (R) к радиусу включения (R_{nv}) [1]. Установлено, что в контакте с включениями в матрице развиваются значительные упругие напряжения, величина которых превышает предел текучести матрицы. Релаксация термических напряжений, возникающих на границах включение–матрица в процессе охлаждения после кристаллизации, горячей деформации или отжига, не локализована в границах раздела, а распространяется на при-

легающие области матрицы и включения (рис. 1, в – д). Следует учитывать релаксационные процессы вблизи включений, происходящие в результате локальных микросдвигов вдоль определенных кристаллографических плоскостей и полигонизационных перестроек дислокационной структуры, поэтому поле напряжений вблизи включения имеет сложную конфигурацию. Термические напряжения провоцируют возникновение дислокационных источников (рис. 1, е).

О сложнонапряженном состоянии стальной матрицы вблизи включений свидетельствуют и многочисленные случаи наличия изгибных экстинкционных контуров в тонких фольгах, наблюдаемые при электронно-микроскопических исследованиях (рис. 1, ж). Характер этих контуров свидетельствует о возникновении вблизи включений упругого или упругопластического изгиба кристаллической решетки, порождающего дальнедействующие поля напряжений [1, 7]. Проводили расчет поля напряжений термического происхождения вблизи включения. Для этого случая получен тензор изгиба кручения, в котором отлична от нуля одна компонента, измеренная на расстоянии 0,5 мкм от включения:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 850 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ рад/см} \quad (2)$$

Величина напряжения σ_d вблизи включения Al_2O_3 в стали 08Ю практически равна рассчитанным термическим напряжениям [1]. С удалением от включения поле напряжений спадает.

В целом, термические напряжения вблизи включений представляют собой негативное явление, поскольку концентрация напряжений приводит к образованию микротрещин при последующей деформации, либо в процессе эксплуатации [1, 3]. Различие значений коэффициентов термического расширения α включений и стальной матрицы свидетельствует не только о возникновении термических напряжений, но также о различии знаков этих напряжений при нагреве или охлаждении, которые могут быть как растягивающими, так и сжимающими. Причем при нагреве, когда происходит термическое расширение включения и стальной матрицы, и при охлаждении, когда происходит соответственно термическое сжатие, эти напряжения могут менять свой знак. В литературе по этому поводу имеются различные трактовки [8, 9], очевидно, это связано с тем, что анализ знака термических напряжений вблизи неметаллических включений проводился без уточнения условий их возникновения – при нагреве или при охлаждении. Авторы указанных работ считают, что вблизи сульфидных включений возникают сжимающие термические напряжения, вблизи оксидных – растягивающие.

Простое сравнение величин коэффициентов α различных включений и стальной матрицы показывает, что необходимы уточнения их физического смысла. При нагреве – это коэффициенты термического расширения, при охлаждении – это коэффициенты термического сжатия. Это связано с изменением знака ($\alpha_m - \alpha_b$) в выражении (1). Как было показано в работе [1], термические напряжения, локализованные вблизи включений, в зависимости от соотношения коэффициентов термического сжатия включения и стальной матрицы при охлаждении имеют разный знак: вблизи оксидов, нитридов, силикатов, карбонитридов – они сжимающие, вблизи сульфидов – растягивающие. Установлено, что сульфиды имеют большую способность к терми-

ческому сжатию, чем оксиды, нитриды. Этот вывод принципиально важен для определения условий влияния неметаллических включений на зарождение коррозионных повреждений, их роли в флокенообразовании и формировании микротрещин при различных условиях нагружения. Например, установлено, что сульфидные включения являются одной из причин флокенообразования в сталях [1], что связано с наличием растягивающих термических напряжений. В то же время, как показано в работе [1], для зарождения усталостного разрушения более вредны оксиды, а по степени вредного влияния неметаллические включения можно распределить в убывающий ряд: корунд, алюмосиликаты, нитриды титана, кремнезем, сульфиды, силикаты кальция, окисульфиды. Таким образом, очень часто важным фактором является не только величина, но и знак термических напряжений вблизи включений.

Возникновение деформационных напряжений вблизи включений связано с локализацией пластической деформации в стальной матрице. Частицы включений традиционно рассматриваются как барьеры, препятствующие развитию внутризеренной деформации. Торможение деформации приводит к поглощению решеточных дислокаций границами включение-матрица, что способствует динамической релаксации напряжений и изменяет свойства межфазных границ. Локализация деформации вблизи включений связана с их действием как концентраторов напряжений в стали.

При пластической деформации на межфазных границах включение-матрица возникают деформационные и контактные напряжения, обусловленные различной деформируемостью включений и стальной матрицы. Включение и матрица представляют собой систему напряженного (включение) и пластичного (матрица) слоев с дислокациями на межфазной границе. Пластическая деформация осуществляется путем сбросов напряжений на концентраторах с испусканием различного рода дефектов. Деформационные и контактные (межповерхностные) напряжения релаксируют в результате возникновения вблизи включений областей нелинейных сильновозбужденных состояний матрицы стали [10].

При всех температурах и скоростях деформации включения, особенно крупные, являются эффективными блокираторами внутризеренного скольжения и двойникования (рис. 2, а). При этом решеточные дислокации скапливаются вблизи границ включение-матрица, выходят на них и поглощаются ими. Поглощения не происходит, если подошедшие к включению решеточные дислокации останавливаются силами изображения на расстоянии $l \sim \Delta Gb^2$, пропорциональном скачку модулей на границе включение-матрица, и образуют приграничный дефектный слой. При образовании плоских скоплений дислокаций вблизи включений на границе включение-матрица должны формироваться встречные упругие поля, затрудняющие релаксационные процессы в этих зонах матрицы.

Локализацию пластической деформации вблизи включений можно рассматривать с двух позиций. Во-первых, на границах включение-матрица формируются источники дислокаций благодаря концентрации деформационных, контактных, термических напряжений (рис. 2, б, в). Во-вторых, вблизи включений при пластической деформации возникают области нелинейных коллективных сильновозбужденных состояний матрицы стали, в которых зарождаются деформационные дефекты. Для развития деформации необходимо обеспечить условия высокой динамической активности элементарных носителей деформации (дислокаций, дисклинаций, границ зерен и т.д.). Деформация осуществляется за счет движения ансамблей сильновоздействующих дис-

локаций, обеспечивающих коллективный эффект массопереноса. Вблизи включений независимо от механизма пластической деформации, обусловленного условиями нагружения, наблюдается ее локализация.

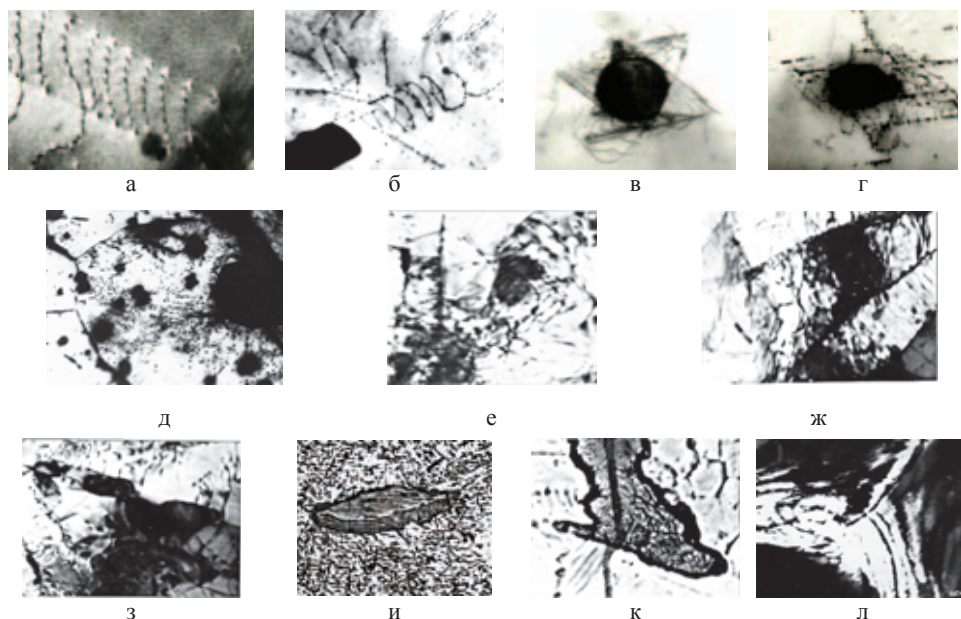


Рис. 2. Локальная структура стальной матрицы вблизи, возникшая вследствие деформационных напряжений; д – $\times 600$; и, к – $\times 900$; ост. – $\times 20000$

Пластическая деформация вблизи включений зарождается вследствие максимальных концентраций напряжений в этих участках как локальное кинетическое структурное превращение и распространяется в зерно путем движения дефектов. Элементарный акт пластической деформации является сугубо релаксационным процессом, сопровождающимся падением локального напряжения. При низких температурах включения способствуют локализации внутризеренной деформации. Релаксация деформационных напряжений может проходить непосредственно от межфазной границы, когда в зерно испускаются дислокации, образующие полосы сдвига, а также в результате развития пластической деформации в прилегающих зонах матрицы, где обнаруживаются дислокационные сетки и факелы скольжения (рис. 2, г, д), которые преобразуются в сложные дислокационные или дисклинационные конфигурации.

Такие структуры наблюдали после растяжения при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $2...5\text{ c}^{-1}$. Сдвиговые процессы имеют ступенчатый характер, обусловленный развитием скольжения в определенных системах. Например, наблюдали постепенное ступенчатое развитие сдвиговой деформации от включения в зерно в двух системах, причем имелись области развития пластической деформации в каждой из двух систем и зона пересечения этих систем скольжения. Вблизи включения имеется и слабо выраженный "факел" скольжения, свидетельствующий о переходе к лавинной релаксации напряжений. Увеличение скорости деформации до 25 c^{-1} подавляет скольжение вблизи включений и делает преимущественной деформацию двойникованием или сбросом, хотя вдали от включений в матрице развивается скольжение. При увеличении скорости деформации растяжением до 50 c^{-1} , а также после взрывного воздействия вблизи включений появились зоны вихревой, ротационной дефор-

магии (рис. 2, е). Развитие пластических ротаций вблизи включений связано со стесненностью пластической деформации. Кроме того, включения создают дальнедействующие поля напряжений, градиент которых создает моментные напряжения, вызывающие в матрице турбулентное течение и образование вблизи поверхности раздела с включением микровихрей и "воронок" деформации [1]. Релаксационные сдвиги по первичной системе скольжения вследствие неизотропности трансляционных потоков неизбежно порождают поле моментных напряжений, действующих вблизи включения. Механизмы релаксации поля поворотных моментов связаны с развитием фрагментации, образованием субграниц вблизи включений. Следует отметить, что аккомодационные процессы, происходящие вблизи включений, также имеют релаксационный характер и могут протекать путем мультиплетного скольжения и образования приграничных зон со структурами сдвигово-поворотного типа.

При горячей деформации стали релаксационные процессы вблизи включений, кроме сдвигово-поворотных актов, включают процессы динамического возврата и рекристаллизации, которые приводят к непрерывной перестройке структуры и как бы к двойной релаксации. Первичная релаксация – это, собственно, развитие процессов деформационного характера, когда деформационные напряжения вблизи включений достигнут критического значения. Вторичная релаксация – это процессы снижения (релаксации) напряжений, обусловленных перераспределением дефектов деформационного происхождения вблизи включений. В протекании вторичной релаксации основные роли принадлежат аннигиляции и переползанию дислокаций, а также стоку решеточных дислокаций в межфазные границы включение-матрица. Оба этапа релаксации происходят практически одновременно и при анализе микроструктуры стали их влияние разделить можно лишь условно.

Релаксационные процессы вблизи включений следует рассматривать также с позиций физической мезомеханики гетерофазных сплавов. В связи с развитием релаксационного многоуровневого подхода к проблеме пластичности твердых тел проводятся исследования процессов пластической деформации на мезомасштабном уровне, в то же время используя традиционные представления о деформационном поведении металлических материалов, в том числе имеющих гетерофазную структуру [11]. Нагружение гетерофазного материала (стали с неметаллическими включениями) характеризуется резко неоднородным распределением напряжений и деформаций [1, 5, 6]. Поскольку пластическое течение в деформируемом твердом теле начинается и развивается более интенсивно в его поверхностном слое по сравнению с объемом металла, большую роль имеет поведение межфазных границ включение-матрица [6]. Как было показано в работах [1, 2, 6], при температурах деформации 25...800 °С границы включение-матрица не принимают участие в пластической деформации, при более высоких температурах развивается проскальзывание вдоль указанных границ. Возможность протекания деформации без нарушения сплошности зависит от способности включений и стальной матрицы к самосогласованному формоизменению. При этом включения имеют разную пластичность, уровень которой зависит от температуры деформации, и являются концентраторами деформационных напряжений в стальной матрице. Необходимость совместности деформации поверхностного слоя и остального объема пластичного включения (сульфида, силиката) должна приводить к развитию в его поверхностном слое деформационной мезоскопической субструктуры, при формировании которой большую роль играют поворотные моды деформации. В объеме деформируемого включения также должна формироваться мезо-

скопическая субструктура, которая связана с формированием в различных зернах включения мезополос локализованной деформации вдоль направлений максимальных касательных напряжений (рис. 2, ж, з).

Пластичность включений и стальной матрицы, т.е. деформации как единого структурного целого, определяется способностью к интенсификации пластической деформации и эффективной диссипации энергии. Это предполагает механическое взаимодействие элементов структуры стали (стальная матрица и включения) через межфазные границы включение-матрица [1, 6]. Очевидно, во включениях вблизи указанных границ при нагружении возникают далекодействующие моментные и ассиметричные напряжения, связанные с их взаимодействием с металлической матрицей, что предполагает появление вблизи этих границ поля тензор-спина (вихревого движения), который связан с тензором моментов напряжений. По-видимому, концентрации напряжений во включениях в зонах стесненной деформации из-за отсутствия условий эффективной диссипации как в стальной матрице, так и во включении не успевают релаксировать, поэтому возникают трещины, которые могут распространяться во включение, в стальную матрицу, а также вдоль межфазных границ включение-матрица [1, 3, 6]. Микропластические сдвиги в деформируемых включениях способны частично перераспределять поле концентратора напряжений. В условиях стесненности пластического сдвига во включениях реализовать их произвольное формоизменение путем дислокационного скольжения затруднительно, необходимо развитие поперечного скольжения дислокаций и пластических поворотов, а также активизация нескольких систем скольжения и локальных сбросов.

Каждый вид неметаллических включений характеризуется своими закономерностями развития деформационных процессов, которые определяются его химическим и фазовым составом, структурой, деформационной способностью включений и их фаз, а также когезивной прочностью межфазных границ включение-матрица. Неметаллические включения должны удовлетворять основному требованию – возможность произвольного формоизменения в любом микрообъеме включения при сохранении непрерывности напряжений или непрерывности деформаций. Такое требование совместности деформаций компонентов в гетерофазной системе подразумевает согласованность формоизменения элементов структуры включений и предполагает вовлечение в деформацию различных структурных уровней. Следует учитывать неравномерное распределение температуры, влияющее на указанные процессы [12, 13].

С точки зрения мезомеханики наряду с локализацией пластического течения в зонах стесненной деформации при температурах 25...600 °С проявляется скольжение по границам включение-матрица (рис. 2, и), которое сопровождается возникновением во включениях периодических аккомодационных сдвигов. Такое поведение границ включение-матрица, в отличие от высокотемпературного проскальзывания, связано не с движением межфазных граничных дислокаций, а с кластерным механизмом массопереноса в этих границах [14], который обусловлен определенным («шахматным») распределением растягивающих и сжимающих напряжений и деформаций на границах включение-матрица. В локальных участках растягивающих напряжений на границе включение-матрица зарождаются сдвиги вдоль максимальных касательных напряжений в пластичное включение. Поворот от каждого локального сдвига порождает во включении аккомодационный сдвиг и мезополосы локализованной деформации, которые распространяются во

включении вдоль направлений максимальных касательных напряжений. Описанные выше процессы пластического формоизменения включений в результате локализации деформации происходят и при высокотемпературной деформации, которая сопровождается проскальзыванием вдоль границ включение-матрица рис. 2, к) [1, 2, 6].

При электронномикроскопических исследованиях на разных стадиях деформации вблизи включений наблюдаются экстинкционные контуры (рис. 2, л), которые являются зафиксированным состоянием пластической деформации, это результат дефектной структуры, связанный с изгибом кристаллической решетки [1, 7]. Контуры представляют собой непрерывные разориентировки, как результат искривления решетки вследствие затрудненного движения дислокаций. Неоднородности плотности дислокаций вблизи включений в процессе деформации сильно искривляют кристаллическую решетку стальной матрицы, поэтому с появлением сильных разориентировок вводят понятие избыточной плотности дислокаций ρ_{\pm} [7], который при пластическом изгибе определяют по градиенту разориентировки $\partial\varphi/\partial\ell$, при этом используют тензор изгиба-кручения или тензор плотности дислокаций [7]. Исследования проводили на фольгах из стали 08X18H10T, подвергнутой растяжению при 25 °C на степень 5...25 %. При степенях деформации до 10 % локально отличны от нуля одна-две компоненты тензора изгиба-кручения (плотности дислокаций), а амплитуды их возрастают с деформацией:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 730 & 0 & 730 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ рад/см} \quad (3)$$

Эти компоненты приведены в качестве примера на расстоянии 1 мкм от включения. С удалением от включения поле далекодействующих напряжений спадает. При усложнении картины экстинкционных контуров с ростом степени деформации до 15 % увеличивается число компонент тензора, отличных от нуля, т.е. усложняется характер изгиба-кручения решетки вблизи включения из-за накопления избыточной плотности дислокаций с различными векторами Бюргера:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 418 & 237 & 237 \\ 0 & 836 & 0 \\ 0 & 0 & 418 \end{vmatrix} \text{ рад/см} \quad (4)$$

При этом усложняется и картина спадания поля напряжений по мере удаления от включения. Поле меняется сложным образом вдоль оси y , при этом изменения компонент x непропорциональны друг другу. Таким образом, с увеличением степени деформации, приводящей к усложнению картины экстинкционных контуров и увеличению избыточной плотности дислокаций значение σ_d вблизи включений резко возрастает. Действительно, картина экстинкционных контуров вблизи включений в деформированном состоянии намного сложнее, чем была в случае термических напряжений (см. выражение (1)), при пластической деформации увеличивается и количество компонент тензора изгиба-кручения, отличных от нуля.

ВЫВОДЫ

Релаксационные процессы вблизи неметаллических включений обусловлены их действием как концентраторов термических и деформационных напряжений. Вблизи включений вследствие далекодействующих моментных и асимметричных напряжений возникают локальные мезоскопические субструк-

туры, для которых характерны повышенная плотность дислокаций, неоднородности плотности дислокаций, пластические повороты, локальные сбросы, сильные разориентировки, скольжение по границам включения-матрица.

Обговорюються релаксаційні процеси поблизу неметалевих включень, що виникають в умовах появи термічних і деформаційних напружень і сприяють появі локальних мезоскопічних субструктур, для яких характерні неоднорідності щільності дислокацій, пластичні повороти, локальні скиди, ковзання по межах включення-матриця. Показано вплив цих процесів на локальні структурні зміни в сталевій матриці, що визначають вплив неметалевих включень і міжфазних меж включення-матриця у формуванні структурної неоднорідності сталей при різних деформаційних і теплових впливах.

Ключові слова: сталь, неметалеві включення, границі включення-матриця.

Relaxation processes near non-metallic inclusions that occur under conditions of the appearance of the thermal and deformation stresses and contribute to the appearance of local mesoscopic substructures, which are characterized by heterogeneities of the density of dislocations, plastic rotations, local discharges, and slip along the on-matrix boundaries were discussed. It was shown the influence of these processes on the local structural changes in steel matrix, which determine the influence of non-metallic inclusions and the inclusion-steel matrix interphase boundaries in the formation of structural heterogeneity of steels under various deformation and thermal effects.

Keywords: steel, non-metallic inclusions, inclusion-steel matrix interphase boundaries.

1. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. Киев, Наукова думка. 2016, 528с.
2. Губенко С.И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках сталей // *Металлофизика, новейшие технологии.* – 2014. – т. 36. – №3. – с. 287-315
3. Gubenko S. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels / Gubenko S., Proidak Y., Kozlovsky A., Shramko A., Iskov M. // *Materials of VIII Scientific Conference "Telematics, Logistics and Transport Safety" TLTS'08, Poland, Katowice-Cieszyn, 2008, oct 16-18.*
4. Ушеренко С.М., Губенко С.И., Ноздрин В.Ф. Изменение структуры железа и стали при сверхглубоком внедрении высокоскоростных частиц // *Известия Академии наук СССР.* – *Металлы*, 1991, №1, с. 124-125.
5. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения // *Известия АН СССР. Металлы.* 1981, №4. – с. 94-97.
6. Губенко С.И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. – Germany-Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2017. – 506 с.
7. Дальнедействующие поля напряжений и их роль в деформации структурно-неоднородных материалов / Козлов Э.В., Лычагин Д.В., Попова Н.А., Тришкина Л.И., Конева Н.А. // В кн.: *Физика прочности и пластичности гетерогенных материалов: Сб. научных трудов ЛФТИ.* – Л.: ЛФТИ, – 1988. – С.3-13.
8. Brooksbank D., Andrews K.W. Tesselated stress associated with some inclusions in steel // *J. Iron and Steel Inst.* – 1969. v. 207. – № 4. – P.474-483.
9. Brooksbank D., Andrews K.W. Stress field around inclusions and their relation to mechanical properties // *J. Iron and Steel Inst.* 1972. – v. 210. – № 4. – P. 246-255.
10. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
11. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
12. Денисенко О.І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О.І. Денисенко, В.І. Цоцко, І.М. Спиридонова, Б.Г. Пелешенко // *Фізика і хімія твердого тіла.* – Т.9. – № 1 (2008). – С. 181-184.
13. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.* – Випуск 3 (56). – Том 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22-29.
14. Панин В.Е. Волновая природа пластической деформации твердых тел // *Изв. вузов. Физика.* – 1990. – № 2. – С.4-18.